

**АНАЛІЗ ОЗНАК ДЕГРАДАЦІЇ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ ВЕЖ ШУХОВА**

Г. М. Никифорчин¹, Г. В. Кречковська¹, А.І. Кутний², О.З. Судент¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України;

²Технічний університет Мюнхена, Німеччина

It was found the corrosion-mechanical signs of degradation the power components of the Shukhov's tower, resulting from its long-term operation for combined influence of loads and atmospheric environment. The fibrillation of metal at the ends of the structural units associated with the wedging-effect of corrosion products, surface corrosion damages and stress corrosion cracking of welded joints between old and repair metals were revealed.

Останнім часом світова наукова громадськість зацікавилися збереженням старовинних інженерних металевих конструкцій, що передбачає дослідження їх реального технічного стану. На сьогодні вже є певний досвід оцінювання технічного стану конструкційних сталей об'єктів відповідального призначення, експлуатованих впродовж тривалого часу [1], у тому числі і вежі Шухова в Миколаєві [2, 3].

Під час ремонтно-відновлювальних робіт у післявоєнний час для з'єднання елементів замість технології клепання було використано зварювання. В тогочасних умовах було не до обґрунтування вибору типу електродів чи режимів зварювання. Все зводилося лише до забезпечення функціонування вежі. Відомо, що зварні з'єднання, особливо після тривалої експлуатації, стають найслабшими ланками зварних конструкцій [4]. Важливою складовою врахування цього аспекту є оцінювання фактичного стану металу елементів веж після їх тривалої експлуатації, у тому числі і зварних з'єднань, що є основою прогнозування їх роботоздатності. Загалом, впродовж сторічної експлуатації елементи веж Шухова зазнали значних ушкоджень корозійного і деформаційного походження. Причому на реальний стан металу впливає не лише поверхнева, але внутрішня пошкоджувальність. Тому оцінювання характеру впливу цих двох типів пошкоджувальності на технічний стан металу після тривалої експлуатації набуває особливої актуальності.

Результати обстеження. Проаналізували характер пошкоджень однієї з сіткових гіперболоїдних конструкцій, а саме вежі Шухова у Черкасах. Вежа виготовлена із перехрещених опорних сталевих кутників, прикріплених до горизонтальних обручів, вигнутих зі сталевих смуги (найнижчий ярус), або кутників (всі інші) з використанням технології з'єднання заклепками. Для того, щоб забезпечити щільний стик в місцях з'єднання їх між собою по всій поверхні стиків полицок обох кутників, що перетиналися, кутники під час монтажу конструкції дещо скручували.

Візуальний огляд зварного з'єднання між обручем найнижчого ярусу з металевих смуги та опорними кутниками виявив їх корозійне розтріскування майже по всій їх довжині (рис. 1а). Розтріскування поширювалося і по металу шва, і в зоні термічного впливу, що свідчить про проблематичність використання тогочасної технології зварювання стосовно старовинного металу. А доцільність використання сучасних технологій зварювання для відновлення пошкоджених з'єднань потребує додаткового обґрунтування.

Найураженішими виявилися елементи найнижчого ярусу вздовж периметра вежі у вигляді тришарового пакету зі смуги, затисненої між вертикальними полицками двох кутників, а їх горизонтальні полицки були з'єднані з металовою підкладкою, встановленою на цементному підмурівку. Внаслідок тривалої експлуатації загальна корозія істотно пошкодила вертикальні полицки кутників, а в багатьох місцях вздовж периметру вежі практично знищила їх горизонтальні полицки (рис. 1 б, в). Причому ушкодження зовнішнього кутника обруча виявилися меншими (на 1/5 периметра вежі), ніж

внутрішнього (на 1/2 її периметра), що спричинено різними умовами стікання крапель дощу та тривалістю висихання вологи. Часто фіксували наскрізні ураження кутників.

Крім того загальною корозією суттєво пошкоджено металеву підкладку між підмурівком та пакетним ободом цього ярусу (рис. 2). Глибина корозійних уражень на підкладці біля одного з опорних кутників досягла 9 мм, а біля іншого (з середини вежі) – 7 мм. На горизонтальній полиці кутників виявили істотні розшарування, пов'язані з розклинювальним ефектом продуктів корозії, об'єм яких перевищує первинний об'єм не окисненої сталі.



Рис. 1. Тріщини в поперечному перерізі зварного шва між опорним кутником та найнижчим горизонтальним обрусом (а) та корозійні ураження на його поверхні (б, в).

Проаналізувавши стан корозійних уражень виявили, що кутники, які розташовані ззовні вежі, пошкоджені в меншій мірі порівняно з тими, що розташовані в її середині. Відзначили також істотну різницю за глибиною корозійних уражень горизонтальних полицок кутників пакетного обруча по периметру вежі. На цій підставі припустили, що не всі кутники найнижчого ярусу були замінені під час реконструкції вежі в 1949 р. Найсильніше пошкоджені кутники вважали за автентичні. Відомо, що швидкість загальної корозії низьковуглецевих сталей становить 0,1 мм/рік. Врахувавши вік вежі (100 років), порахували, що стоншення перерізу за цей час в сприятливо розташованих для протікання корозії місцях повинно досягти 12 мм. Отже з урахуванням товщини стінки кутників (10 мм) це б привело до наскрізного пошкодження корозією всього перерізу горизонтальних полицок кутників, що і спостерігали на значній частині кутників вздовж периметру вежі. Також були кутники, глибина корозійних уражень яких становила 7...7,5 мм. Саме на таку глибину повинна поширитися корозія за 64 роки експлуатації реконструйованої в 1949вежі. Тенденція зміни глибини корозійних уражень на підкладці була подібною. Отже, елементи конструкції з найглибшими корозійними ушкодженнями віднесли до 1904 р., а інші – до 1949 р. виготовлення. За приблизними оцінками одна третина елементів (кутників, смуг з обруча і підкладки) нижнього ярусу були замінені під час реконструкції вежі.



Рис. 2. Розшарування з торця горизонтальної полицки пакетного обруча.

Результати обстеження нижньої частини опорних кутників. Опорні кутники з шириною полицки 100 і її товщиною 10 мм, нахилені до основи вежі і на рівні 1-го ярусу розташовані на віддалі 740 мм один від одного. Корозійні ураження цих елементів виявили в зонах їх контактування зі смугою пакетного ободу 1-го ярусу, до якого вони кріпилися заклепками (рис. 3а), а ще сильніші – в зонах їх контактування з кутиками пакетного ободу, де виникали сприятливіші умови для затримування вологи (рис. 3б, в). Проте навіть в самому низу опорних кутників корозійні ураження металу елементів пакетного ободу (кутників і смуги між ними) були сильнішими, ніж самих опорних кутників. Цим підтверджено, що в місці контактування старовинного і ремонтного металу перший виявився схильнішим до корозії. В околі опорних кутників глибина корозійних уражень на

ободі і особливо на горизонтальній полиці кутників внизу обода змінюється від 3 до 7 мм. Чим ближче розташований опорний кутник до горизонтальної полицки кутника внизу обода, то ширші і глибші корозійні ураження виникають і на смузі, і на кутнику обода.

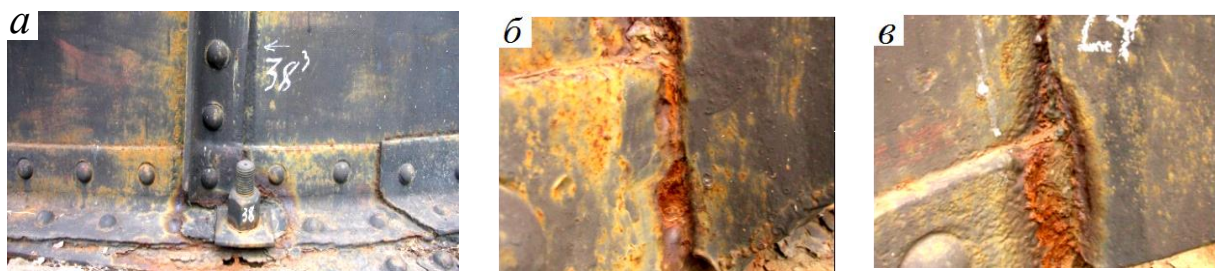


Рис. 3. Нижня частина опорних кутників Вежі Шухова

Конструктивно в нижній частині опорних кутників пресуванням сформовано невисоку сходинку (на товщину полицки кутника внизу обода, щоб кутник щільно приліг до нього). Саме в зонах потрійних стиків складових пакетного обруча і опорних кутників вздовж периметру вежі виявили найсильніші корозійні ураження, пов'язані з сприятливими умовами для затримування вологи в них (рис. 3в). Коли опорний кутник і горизонтальний кутник внизу обруча були виготовлені з однакового ремонтного металу, то корозійних уражень в потрійних стиках не спостерігали. Звідси прийшли до висновку, що можливо існує електрохімічне підсилення корозійних процесів в місці контактування старовинного і ремонтного металів.

Пошкодження колового обруча другого ярусу. Цей обруч виготовлений у 1949 р. з ремонтних кутиків 100x100x10 мм. Фрагменти кутників обода з'єднані між собою зварюванням. Горизонтальна полицка кутника цього обода зафіксована з використанням зварювання на кронштейнах, закріплених на опорних кутниках за допомогою заклепок. Половина зварних швів між кронштейнами і обручем ушкоджені, що спричинено залишковими напруженнями, які виникли у зварному шві через істотний натяг під час зварювання елементів, або через невідповідність нахилу горизонтальних полицок кронштейнів і обруча цього ярусу. На горизонтальній полицці обруча волога може затримуватися впродовж довшого часу і сумісно з залишковими напруженнями можуть виникати сприятливі умови для корозійного розтріскування зварних швів під напруженням (рис.4).



Рис. 4. Пошкоджені зварні з'єднання між кронштейном на опорному кутнику та коловим обручем другого ярусу (а), між кронштейном та опорним кутником (б) та типове корозійне розтріскування зварного з'єднання (в).

Попри збереження зварних швів на самому обручі 2-го ярусу неушкодженими, практично 2/3 швів між кронштейнами та обручем зруйновані. Це спричинено тим, що для виготовлення кронштейнів використали старовинну, а для самого обода - ремонтну сталь. Неузгодженість їх складу разом із залишковими напруженнями спричинили руйнування зварних з'єднань між ними. На поперечному шліфі зварного з'єднання між кронштейном на опорному кутнику та обручем 2-го ярусу виявили тріщини криволінійні за морфологією та їх макрогалуження, що є ознакою корозійного росту тріщини під навантаженням (рис. 4в). Траплялися також пошкоджені зварні з'єднання між кронштейнами та опорними кутниками (рис. 4б). Пошкодження з'єднань між кронштейнами та коловим обручем 2-го ярусу зменшують жорсткість конструкції і

збільшують навантаження на інші її елементи. Ці пошкодження слід усунути, використавши для цього сучасні технології та електроди для зварювання.

Особливості уражень заклепок та анкерних болтів. Автентичні заклепки, розташовані на горизонтальній полиці обруча з кутника по низу пакетного обруча нижнього ярусу вежі, руйнувалися поетапно. Спочатку внаслідок корозії на поверхні головок заклепок формувалися глибокі виразки (рис. 5а). Поступово пошкоджений метал відшаровувався і відлущувався (рис. 5б) аж до повного знищення головки заклепок, а потім і її стержневої частини (рис. 5в).



Рис. 5. Етапи руйнування автентичних заклепок на вежі Шухова

Горизонтальні полицки кутників внизу обруча 1-го ярусу дещо zdeформовані і вода має можливість затримуватися на їх поверхні. Це створює сприятливі умови для корозії не лише металу кутників і металевої підкладки між ними і підмурівком, але і анкерних болтів (рис. 6а). При цьому волога, потрапивши в зону концентрації напружень у різьбовому з'єднанні анкера з зовнішньою гайкою, сприяє його руйнуванню за механізмом корозійного розтріскування під навантаженням (рис. 6б).



Рис. 6. Наслідки затікання води в зону натягу анкерних болтів (а) та їх руйнування внаслідок сумісного впливу навантажень від натягу болта та корозивного середовища (б).

Висновок. Проаналізувавши елементи тривало експлуатованої вежі Шухова у Черкасах, виділили наступні ознаки деградації: виразки від корозійних уражень, корозійне розтріскування зварних швів, корозійний ріст тріщин в них під навантаженням, розшарування, пов'язані з розклинювальним ефектом продуктів корозії.

1. Никифорчин Г.М. Особливості експлуатаційної деградації конструкційних сталей «в об'ємі» за дії агресивних середовищ / Г.М. Никифорчин, О.Т. Цирульник // Проблеми прочності – №6 – 2009. – С.79 – 94.
2. Опір крихкому руйнуванню металу металу сіткової гіперболоїдної вежі Шухова / Г.В. Кречковська, О.З. Студент, А.І. Кутний та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, 4. – С. 87–93. (Brittle-fracture resistance of the metal of hyperboloid gridshell Shukhov tower / H.V. [Krechkov's'ka](#), O.Z. [Student](#), A.I., [Kutnyi](#) et al // Materials Science. – 2013. – 49, 6. – P. 787–795.)
3. Структура і властивості тривало експлуатованих сталей гіперболоїдних сіткових веж Шухова / Г.М. Никифорчин, А.І. Кутний, О.З. Студент, Г.В. Кречковська та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – 49, 6. – С. 70–78. (Structure and properties of the steels of hyperboloid gridshell Shukhov's towers after long-term operation / H.M. Nykyforchyn, A.O. Kutnyi, O.Z. Student, H.V. Krechkov's'ka et al // Materials Science. – 2013. – 49, 6. – P. 787–795.)
4. Деградація зварних з'єднань парогонів теплоелектростанцій у наводнювальному середовищі / Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, І.Р. Дзіоба та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, 6. – С. 105-110. (Degradation of welded joints of steam pipelines of thermal electric power plants in hydrogenating media / H.M. Nykyforchyn, O.Z. Student, I.R. Dzioba // Materials Science. – 2004. – 40, 6. – P. 836-843.)